

# 基于动态水位的航线可行性分析方法

张立华<sup>1,2</sup> 刘雁春<sup>2</sup> 朱 庆<sup>3</sup> 韩元利<sup>4</sup>

(1 中国科学院地理科学与资源研究所资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京市朝阳区大屯路甲 11 号, 100101)

(2 大连舰艇学院海测工程系, 大连市解放路 667 号, 116018)

(3 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

(4 武汉工程大学计算机学院, 武汉市雄楚大街 693 号, 430073)

**摘要:** 提出了一种基于动态水位的航线可行性分析方法, 通过追踪安全等深线, 求取随瞬时水位时变的障碍区, 然后分段判断航线与障碍区的相交情况, 测试航线的可行性, 求解可行性时间。实验表明, 该方法能有效地分析动态水位影响下的航线可行性, 扩大通航能力, 缩短航程。

**关键词:** 动态水位; 可行性分析; 航线; 障碍区

**中图法分类号:** P229.3

航线设计是海上安全航行的先导和基础<sup>[1,2]</sup>。在过去几年中, 航线的可行性分析得到了不少学者的关注<sup>[2-4]</sup>。由于潮汐的影响, 海水的瞬时深度并非如传统海图上所表示的静态水深那样保持稳定, 而是随水位不断变化的。随着数字潮汐模型的精化和实时监控手段的成熟以及电子海图的广泛应用, 采用动态分析的技术条件已经成熟, 如何建立动态分析的数学模型, 提出解算方法, 成为一个难点问题。本文建立了一种基于动态水位的航线可行性分析方法。

## 1 基本数学模型的构建

### 1.1 可行性表达模型

对于给定的某一条计划航线, 其可行性  $N$  依赖于其经过的路线  $L$ , 舰船航行所需要的安全水深为  $h$ , 数学模型可表达为  $N(L, h)$ 。如果考虑航线动态水位的影响, 可表达为  $N(L, h, w)$ 。其中,  $w$  为舰船经过航线上的瞬时水位, 与地理位置和时间  $t$  相关<sup>[4]</sup>。一条航线由一个或多个直线航段组成,  $L = \{L_1, L_2, \dots, L_{n_1}\}$ ,  $L_i$  为某直线航段 ( $i=1, 2, \dots, n_1$ ,  $n_1$  为组成航线的直线航段数)。若用数值 1 表示某直线航段可安全航行, 0 表示不可安全航行,

整条航线的可行性  $N(L, h)$  可表达为:

$$N(L, h) = N(L_1, h) \times N(L_2, h) \times \dots \times N(L_{n_1}, h) \quad (1)$$

如果考虑瞬时水位  $w$  的影响, 基于动态水位的航线可行性可表达为:

$$N(L, h, w) = N(L_1, h, w) \times N(L_2, h, w) \times \dots \times N(L_{n_1}, h, w) \quad (2)$$

由于水位  $w$  是一个关于时间  $t$  的函数,  $N(L, h, w)$  是一个时态问题  $N(L, h, w(t))$ , 对于某一舰船, 其安全水深  $h$  为一常值, 如果选定路线  $L$ , 可判断其在某时刻  $t$  的可行性。同时, 对于路线  $L$ , 也可以逆向求解可航行的时间  $t$ 。

### 1.2 障碍区表达模型

基于数字海底模型和舰船航行所要求的安全水深  $h$ , 可以求解安全等深线。根据等深线方向的定义<sup>[5]</sup>, 沿安全等深线正向, 左为浅水区, 右为深水区。沿等深线正向, 节点逆时针排列的闭合安全等深线的内部为浅水区域, 如图 1 中的  $A_1$ 。沿非闭合等深线的正向, 逆时针将其与研究区域外边界形成一封闭区域, 其内部也为浅水区域, 如图 1 中的  $A_2$ 。这两种浅水区组成自然障碍区。节点顺时针排列的闭合等深线, 尽管内域深于安全水深, 如图 1 中的  $A_3$ , 但其位于更大障碍区  $A_2$  的内部, 航线分

析时将其合入外围障碍区。除从安全等深线提取的自然障碍区外, 还有养殖区、沉船等点、线、面障碍物的影响范围, 为人工障碍区, 如图 1 中的方框内区域  $A_4$ 。考虑到定位和其他不确定性因素的影响, 还可对障碍区范围进行一定量的扩大, 并进行扩充后障碍区相交的处理, 如图 1 所示。

随着水位  $w(t)$  的变化, 障碍区范围也会发生相应的改变, 可用集合  $O_{w(t)} = \{O_1, O_2, \dots, O_{n_2}\}$  来表示,  $n_2$  是水位为  $w(t)$  时的障碍区数。如图 2 所示, 当  $w(t)$  达到最高水位时, 障碍区范围达到最小值  $O_{Min}$ ; 当  $w(t)$  达到最低水位时, 障碍区范围到达最大值  $O_{max}$ ;  $O_{max}$  外的区域任何时刻都为安全航行区。

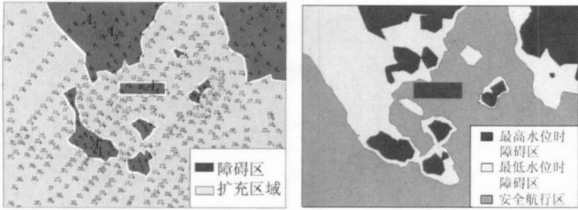


图 1 障碍区

图 2 高低水位时的障碍区

Fig. 1 Obstacle Areas

Fig. 2 Obstacle Areas at High Water and Low Water

## 2 航线可行性分析方法

### 2.1 可行性判断的基本法则

判断某航段的可行性, 通过判断其是否与障碍区相交来实现。对于某直线航段  $L_i (i = 1, 2, \dots, m_1)$ : ① 如果  $L_i \cap O_{max} = \emptyset$ , 则  $N(L_i, w(t)) = 1, t \in (-\infty, +\infty)$ ; ② 如果  $L_i \cap O_{min} = -\emptyset$ , 则  $N(L_i, w(t)) = 0, t \in (-\infty, +\infty)$ ; ③ 如果  $L_i \cap O_{max} = -\emptyset$  且  $L_i \cap O_{min} = \emptyset$ , 则  $N(L_i, w(t))$  的值依赖于动态水位  $w(t)$ , 在某些时刻  $N(L_i, w(t)) = 1$ , 这种航段也称为时变可行性航段。

判断各航段的可行性后, 利用式 (2) 可解算整条航线的可行性。但其中一类情形是不能直接解算的, 也就是不存在直线航段  $N(L_i, w(t)) = 0$ , 存在  $L_i \cap O_{max} = -\emptyset$  且  $L_i \cap O_{min} = \emptyset$  的情形。这种航线也称为时变可行性航线。

### 2.2 时变可行性航线分析

时变可行性航线由可行性航段和时变可行性航段组成, 时变可行性航段的分析是问题的关键。分析某一时变可行性航段  $L_i$ , 需先求取  $L_i$  与  $O_{max}$  的所有交点的位置, 并按距离  $L_i$  起点的大小进行排序。如图 3(a) 所示, 求出  $SD$  与  $O_{max}$  的交点, 并按到  $S$  的距离由近到远进行排序, 每两个交点为一对, 每一对交点分别为穿越障碍区的起点与终点。

如图 3(a) 中的  $P_1$  和  $P_2$ 、 $P_3$  和  $P_4$ 。各对交点之间的航程称为时变可行性区段  $l_j$ , 如图 3(a) 中  $P_1$  和  $P_2$  间的航程为  $l_1$ 。时变可行性航线分析问题转化为:

$$N(L, h, w(t)) = N(l_1, h, w(t)) \times N(l_2, h, w(t)) \times \dots \times N(l_{n_3}, h, w(t)) \quad (3)$$

式中,  $j = 1, 2, \dots, n_3$ ,  $n_3$  为时变可行性区段的数目。

以上只讨论了航段起点和终点位于  $O_{max}$  外的情形。实际中可能出现的情形有: 起点和终点都位于  $O_{max}$  外, 见图 3(a); 起点和终点都位于同一障碍区内, 见图 3(b); 起点和终点都位于不同障碍区内, 见图 3(c); 起点和终点中一个位于障碍区内, 另一个位于障碍区外。一种较为巧妙的处理是: 起点或终点若位于障碍区内, 它们也算上一个交点。起点为第一个交点, 终点为最后一个交点。这样, 如果没有另外的交点, 见图 3(b), 由起点和终点组成一个时变可行性区段; 否则, 起点与离起点最近的一个交点(见图 3(c) 中的  $P_1$ 、图 3(d) 中的  $P_2$ ) 组成一个时变可行性区段, 离终点最近的一个交点(如图 3(c) 中的  $P_2$ 、图 3(d) 中的  $P_4$ ) 与终点组成一个时变可行性区段。

某舰船计划在某时刻  $t$  从出发点以一定的船速  $v$  开始航行, 则其到达第  $j$  个时变可行性区段起点的累积航程为  $s_j$ , 时间为  $\tau_j = s_j / v$ 。如图 3(a) 所示,  $P_1P_2$  为某舰船计划在某时刻  $t$  从  $S$  出发的第一个时变可行性区段  $l_1$ , 假设以一定的船速  $v$  开始航行, 航行到  $P_1$  的时刻为  $\tau_1 = t + s_1 / v$ ,  $s_1$  为  $S$  到  $P_1$  的距离。在  $t + s_j / v$  时刻, 需要根据水位模型  $w(t + s_j / v)$  重新计算当前水位下的时变障碍区  $O_{w(\tau_j)}$ 。如果  $l_j \cap O_{w(\tau_j)} = \emptyset$ , 则  $N(l_j, w(\tau_j)) = 1$ ; 否则,  $N(l_j, w(\tau_j)) = 0$ 。

当然, 由于航行在每一时变可行性区段, 如图 3(a) 中的  $P_1P_2$ 、图 3(c) 中的  $SP_1$  等, 需要一定的时间, 在此时间段内水位还会发生变化。如果以一定的航速, 穿过时变可行性区段  $P_1P_2$  的时间较长时, 还不能简单地用  $w(\tau_j)$  的水位来求解整个区段  $l_j$  的障碍区, 判断航段的可行性。由于水位还是在不断变化, 更准确的水位模型应用  $w(\tau_j + \tau_j')$  来表示。

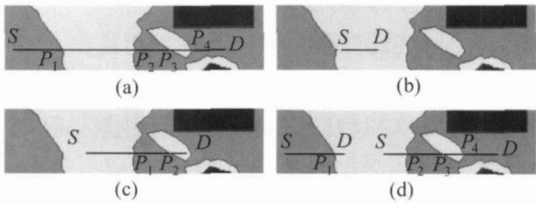


图 3 航段端点与障碍区的关系

Fig. 3 Relations of Endpoints of a Route

Segment and Obstacles

$\tau'$ 表示从某时变可行性区段起点开始起算的时间。在实际中,不能对每个时刻都进行计算,需要以一定的尺度将问题离散化。一种较为简单的处理方法是:将时变可行性区段分成多个子区段,对每个子区段进行时变可行性测试。分割各子区段大小的依据是保证在此子区段内不会发生影响结果的水位变化。

本文采用距离均分区段确定测试时刻。假设在时间 $\Delta\tau$ 内水位不会发生影响最终结果的变化,船速保持 $v$ 匀速航行,那么在 $\Delta s=v\cdot\Delta\tau$ 内的距离可以不考虑水位变化。如果 $P_1P_2<\Delta s$ ,则可直接求解 $N(l_j,w(t+s_j/v))$ ;如果 $P_1P_2>\Delta s$ ,则需对 $P_1P_2$ 进行均匀分割,使分割后所得的各子区段小于 $\Delta s$ 。如图4所示,假设对某时变可行性航段进行平均分割后的均分点为 $M_1、M_2、\cdots、M_n$ ,子区段的个数可由下式确定:

$$n^4=\text{int}(s_{M_1M_2}/(v\cdot\Delta t))+1\tag{4}$$

式中, $s_{M_1M_2}$ 是时变可行性区段的长度;int表示取整。

接下来对各子区段进行可行性测试。依次测试经过图4中线段 $M_1M_2、M_2M_3、\cdots、M_{n-1}M_n$ 的可行性,表示为:

$$N(l_{j_k},w(t+s_j/v+(k-1)\times\Delta\tau))$$

$(k=1,2,\cdots,n^4)\tag{5}$

为进一步消除水位计算误差的影响,用经过各子区段中点时刻的水位作为整个子航段的水位,表达为:

$$N(l_{j_k},w(t+s_j/v+\Delta\tau/2+(k-1)\times\Delta\tau))\tag{6}$$

整个直线区段的可行性表达为:

$$N(l_j,w(\tau_j))=N(l_{j_1},w(t+s_1/v+\Delta\tau/2))\times$$
$$N(l_{j_2},w(t+s_2/v+\Delta\tau/2+\Delta\tau))\times\cdots\times$$
$$N(l_{j_{n_4}},w(t+s_{n_4}/v+\Delta\tau/2+(n_4-1)\Delta\tau)\tag{7}$$



图4 时变可行性区段的分割

Fig. 4 Division of a Time-Varying Navigable Segment

2.3 可行性时间的求解

前面所述的只是计划航线的可行性测试,对于舰船在什么时间窗口内能通过时变障碍区域,本文采用较为简单的判断尝试法:从某时刻 $t$ 起,以一定的时间间隔 $\Delta t$ ,不断测试航线 $N(L_i,(t+m\times\Delta t))=1$ 的时刻( $m=1,2,\cdots,n_s$ ), $n_s=T/\Delta t$ , $T$ 为当地数字水位模型的周期),所有可行性的时间段组合在一起就构成了某个水位变化周期内的可行性时间窗口。

3 实验与分析

3.1 可行性实验

为了验证所提算法的有效性,利用以下数据进行了实验。如图5所示,对于所需安全水深 $h$ 为12 m的某舰船,如果不考虑水位的影响,航线 $SP_1P_2D$ 是不能安全航行的,但如果能充分利用水位变化的影响,则航线 $SP_1P_2D$ 是有可能安全航行的。本文通过几组数据对航线 $SP_1P_2D$ 进行了更为具体的可行性测试,实验结果如表1所示。

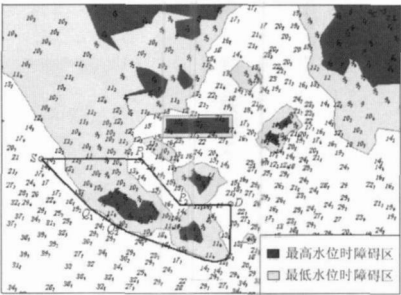


图5 航线的可行性测试

Fig. 5 A Test for Navigable Routes

表1 基于不同出发时间与航速的航线可行性结果

Tab. 1 Feasibility of a Route Based on Different Starting Time and Ship Speeds

序号	出发时间	航速/节	可行性结果
1	03:00	4	可行
2	03:00	24	可行
3	03:30	4	不可行
4	03:30	24	可行
5	04:00	4	不可行
6	04:00	24	不可行

假如某舰船需要从 $S$ 沿航线 $SP_1P_2D$ 安全到达 $D$ ,当航速分别为4节、24节时,从点 $S$ 的出发时间窗口分别为0018~0316、0025~0340。

3.2 航道利用率对比

如果不利用水位变化的影响,航线 $SP_1P_2D$ 是不可行的,绕过障碍区的最短航程为 $SQ_1Q_2\cdots D$ 。为了进一步反映动态水位对航道资源利用的影响,本文对几组数据进行了对比实验,结果如表2所示。最小水深是考虑动态水位前后设计航线所经过的最小水深。航程是针对安全水深12 m的舰船,在动态水位分析中,为设计航线的距离;在静态水位分析中,为不考虑水位变化影响时,相应起点到终点的最短安全航线的距离。从表3可以看出,考虑动态水位后,可增大航线上的最小水深,从而扩大通航能力,缩短了出发点到目的点的航程。需要指出的是,增大的最小水深和缩短的航程与航线

所经位置的潮差和地形相关。

表 2 考虑动态水位前后的通航能力与航程对比/ m

Tab. 2 Comparison of Minimum Depth on a Route and Voyage Before and After Considering Instantaneous Water Levels

序号	最小水深		航程	
	传统静态分析	动态水位分析	传统静态分析	动态水位分析
1	9. 1	12. 2	17 095	13 242
2	8. 5	12. 3	24 758	10 123
3	9. 5	12. 5	38 527	12 245
4	8. 9	12. 3	58 746	40 439

4 结 语

本文针对传统静态海图上航线设计的不足, 提出了基于动态水位的航线分析方法。实验证明了此方法适用于动态水位条件下的航线可行性判断。与传统的航线分析方法相比, 可扩大通航能力, 缩短航程。这种分析方法在商用船只的候潮进港和军舰的特殊机动中具有重要意义。当然, 本文只研究了较为简单的情形, 在潮汐变化复杂区域, 还需

要建立高精度的动态水位预测模型, 对于大区域分析, 还需要考虑多数据集的合成和方法的快速解算等问题, 这些都有待于进一步研究。

参 考 文 献

[ 1] Rafal S. A New Method of Ship Routing on Raster Grids, with Turn Penalties and Collision Avoidance [ J] . The Journal of Navigation, 2006, 59( 1) : 371-384

[ 2] 王科. 基于电子海图的航线设计研究[ D] . 大连: 海军大连舰艇学院, 2004

[ 3] 李源惠, 孙少鹏, 于卫红. 电子海图中计划航线可行性的自动判别[ J] . 大连海事大学学报, 2000, 26( 2): 40-43

[ 4] 孟德润, 田光耀, 刘雁春. 海洋潮汐学[ M] . 北京: 海潮出版社, 1993

[ 5] 张立华, 朱庆, 暴景阳, 等. 一种基于数字伴潮海岸线的潮滩淹没区仿真算法[ J] . 武汉大学学报·信息科学版, 2007, 32( 7): 637-639

第一作者简介: 张立华, 副教授, 博士。主要从事军事海洋多维 GIS 研究。  
E-mail: zlhua@163. com

Analysis of Feasibility of Routing Based on Changing Water Levels

ZHANG Lihua<sup>1, 2</sup> LIU Yanchun<sup>2</sup> ZHU Qing<sup>3</sup> HAN Yuanli<sup>4</sup>

- (1 State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, 11A Datun Road, Beijing 100101, China)
- (2 Department of Hydrography and Cartography, Dalian Naval Academy, 667 Jiefang Road, Dalian 116018, China)
- (3 State Key Laboratory for Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)
- (4 School of Computer, Wuhan Institute of Technology, 693 Xiongchu Street, Wuhan 430073, China)

**Abstract:** A method for analyzing a planned route considering the effect of changing water level is proposed. The method traces safety contour, and computes dynamically obstacle areas with instantaneous water level. The feasibility is tested by the intersection of the subsection in a route and time-varying obstacle areas, and navigable time window is computed. Experimental results demonstrate that the proposed method can conclude effectively feasibility of the route considering instantaneous water level; moreover it can lead to greater available depths in a route and a shorter distance for safe navigation.

**Key words:** changing water level; feasibility analysis; route; obstacle areas

About the first author: ZHANG Lihua, associate professor, Ph. D. His interested field is military marine multi-dimensional GIS.  
Email: zlhua@163. com